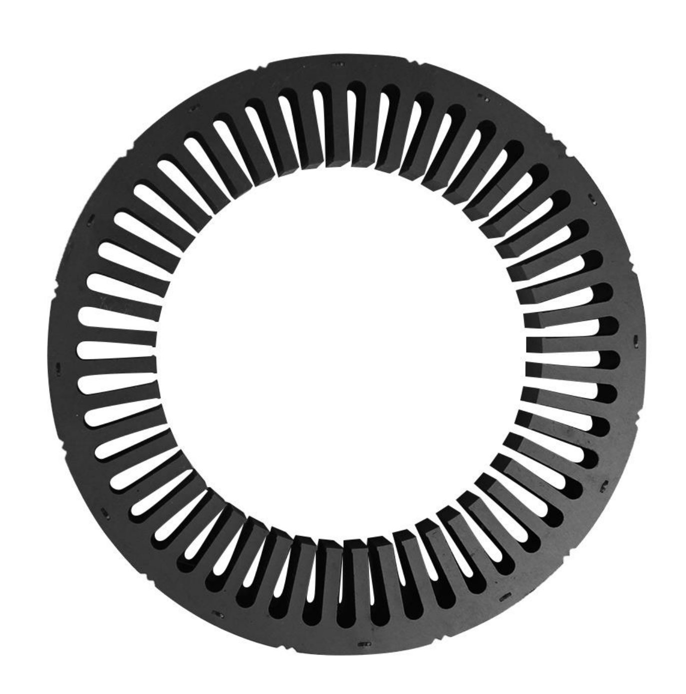
Пересчет обмотки асинхронного двигателя при ремонте



В настоящем документе представлена только часть указанного издания, касающаяся практического пересчета обмоток асинхронных двигателей при ремонте.

Маршак Евсей Львович

"Ремонт всыпных обмоток асинхронных двигателей." 1975 г.

Rev. 04   8 Feb 2021

2. Схемы обмоток.

Исходным элементом, из которого составляется схема обмотки, является катушка, состоящая из одного или нескольких последовательно соединенных витков. Витком является элемент, состоящий из двух последовательно соединенных между собой проводников, расположенных под соседними разноименными полюсами. Проводники, образующие виток, могут быть подразделены на несколько параллельных проводов. К подразделению витка прибегают для удобства намотки во избежание применения грубого провода большого сечения. Части катушки, лежащие в пазах сердечника, стали, являются *пазовыми или активными* частями катушки, так как они пронизываются магнитным потоком и непосредственно участвуют в создании э. д. с. Проводники, лежащие вне пазовой части и служащие для соединения между собой активных частей катушки, называются *лобовыми частями* катушки.
Катушка помимо определенного числа витков характеризуется также своим шагом, т. е. числом пазовых делений, заключенных между центрами пазов, в которые закладываются стороны катушки. Шаг катушки у называют диаметральным, если он равен полюсному делению τ. В этом случае:

$$y = \tau = \frac{Z}{2p}$$

где Z – число пазов статора; $2p$ – число полюсов обмотки.
Полюсное деление (*см*.) представляет длину части окружности расточки статора, приходящуюся на долю одного полюса:

$$\tau = \frac{\pi \times D}{2p}$$

где D – диаметр расточки статора, *см*.
В двухполюсной электрической машине центральной угол, соответствующий полюсному делению, составляет 180°, в четырехполюсной 90°, в шестиполюсной 60°. При составлении схем обмоток принято при любом числе полюсов электродвигателя считать угол, соответствующий полюсному делению, равным 180 эл. град.
Тогда число электрических градусов в окружности расточки электрической машины с любым числом полюсов будет равно $180 \times 2p$.
Шаг катушки может быть несколько меньше диаметрального, в этом случае его называют укороченным. Укорочение шага катушки (обмотки) характеризуется коэффициентом укорочения:

$$ky = \frac{y}{\tau}$$

где: ky – укороченный шаг обмотки.
Несмотря на то что укорочение шага влечет за собой уменьшение э. д. с., индуктируемой в катушке (так как обе стороны витка при укороченном шаге не могут одновременно находиться под центрами соседних полюсов), оно широко применяется в двухслойных обмотках, так как помимо экономии меди на длине лобовых частей улучшает электрические свойства электродвигателя и облегчает укладку катушек в пазы.
В различных типах обмотки применяется укорочение шага обычно 0,85 – 0,75, реже до 0,66, а в отдельных случаях и до 0,5.
Характерным показателем обмотки электродвигателя является *число пазов на полюс и фазу q*. Это число показывает, сколько катушечных сторон каждой фазы приходится на один полюс обмотки. Поскольку катушечные стороны одной фазы, лежащие под двумя соседними полюсами обмотку, образуют катушечную группу, то число q показывает, из скольких катушек состоят катушечные группы данной обмотки.

Таким образом:

$$q = \frac{Z}{2p \times m}$$

где m – число фаз обмотки.

Для рассматриваемых нами трехфазных обмоток:

$$q = \frac{Z}{6p}$$

Для примера, где Z = 60, 2p = 4:

$$q = \frac{60}{6 \times 2} = 5$$

Если же статор этой машины использовать для изготовления восьмиполюсной машины:

$$q = \frac{60}{6 \times 4} = 2{,}5$$

т. е. число пазов на полюс и фазу будет дробным.

Так как число катушек в каждой отдельной катушечной группе может выражаться только целым числом, то при дробном q катушечные группы не одинаковы – содержат разное число катушек, т. е. дробное q определяет среднее число катушек, содержащихся в катушечных группах.

Из условий симметрии обмотки следует, что все три ее фазы должны иметь одинаковое количество катушек, симметрично расположенных по окружности сердечника стали. Именно в этом случае суммарные э. д. с. фаз обмотки будут равны по величине и сдвинуты между собой на 120° или 240°.

Катушки должны быть соединены в катушечные группы, а последние – в фазы так, чтобы обеспечить необходимое количество полюсов обмотки и правильное их чередование.

Катушки внутри катушечной группы соединяются между собой всегда последовательно, а катушечные группы в фазе могут быть соединены последовательно, параллельно или смешанным способом (последовательно–параллельно). Основным правилом при пересоединении последовательной обмотки в параллельную или смешанную является сохранение направления тока в катушечных группах таким же, как это имело бы место при последовательном соединении, в котором направление токов определяется чередованием полюсов обмотки.

На схеме требуется указать способ соединения фаз обмотки в звезду или в треугольник. Каким из этих способов должны быть соединены фазы, определяют расчетом обмотки.

Для одного и того же номинального напряжения для различных машин могут применяться как один, так и другой способ. Само соединение фаз может быть выполнено как внутри машины, глухо, так и при помощи перемычек на специальном щитке, вынесенном на корпус машины. Последний способ удобен тем, что позволяет более четко проводить профилактические испытания обмотки в процессе эксплуатации, так как начала и концы всех фаз могут быть свободно присоединены к испытательной аппаратуре.

Очень часто электродвигатели бывают пригодны для работы на любом из двух номинальных напряжений, находящихся в соотношении $1 : \sqrt{3}$, например, 127 и 220 *в*, 220 и 380 в или 380 и 660 *в*; тогда при меньшем из этих двух напряжений его фазы должны быть соединены в треугольник, а при большем в звезду.

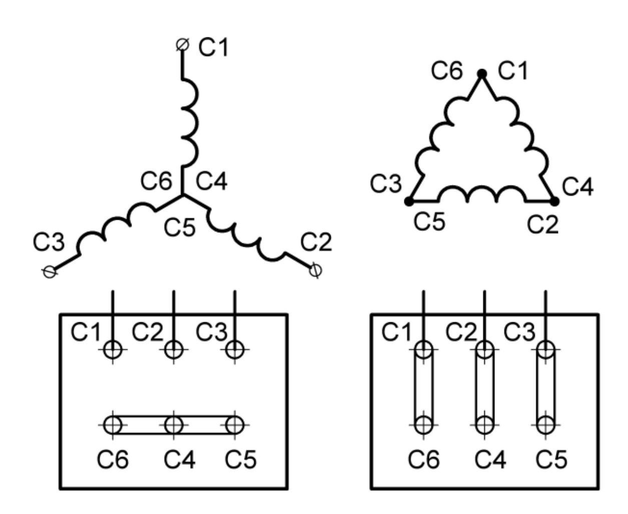


Рис. 1. Соединение фаз обмотки электродвигателя напряжением 220/380 В.
а – в звезду на 380 *в*; б – в треугольник на 220 *в*.

На рис. 1 показаны принципиальные схемы соединения фаз обмотки и соответствующие этим соединениям переключения, производимые на внешнем щитке для асинхронного двигателя на номинальные напряжения 220/380 *в*.

Обмотки электродвигателей подразделяются на *петлевые* и *волновые*. Петлевые обмотки, как правило, используются для статоров, а волновые – для фазных роторов асинхронных двигателей. Как петлевые, так и волновые обмотки могут быть *однослойные и двухслойные.* При однослойной обмотке каждая сторона катушки занимает весь паз, при двухслойной обмотке сторона катушки занимает по высоте только половину паза, т. е. в каждый паз закладываются две стороны катушки, образуются два слоя обмотки.

Из сказанного следует, что при однослойной обмотке число катушек равно половинному числу пазов, а при двухслойной – полному числу пазов.

Основными недостатками однослойных обмоток по сравнению с двухслойной являются увеличенный (доходящий до 20%) расход меди и ограниченные возможности построения схемы обмотки с укороченным шагом и с дробным q для наиболее распространенного вида однослойных обмоток – концентрических.

Указанные недостатки однослойных обмоток ограничивают их применение, с другой стороны, однослойные обмотки позволяют существенно повысить коэффициент заполнения паза из–за отсутствия изоляционного слоя между катушками, в середине паза. Перед тем как перейти непосредственно к рассмотрению схем обмоток, следует обусловить приемы изображения схем на чертежах.

Чертеж схемы в условном виде представляет собой развертку окружности статора или ротора на плоскости. Пазы и стороны, уложенных в них катушек, изображают прямыми линиями. Схемы двухслойных обмоток в пазовой части изображают двумя рядом расположенными линиями – сплошной и пунктирной, причем сплошная линия обозначает сторону катушки, уложенную в верхнюю часть паза, а пунктирная линия – нижнюю сторону катушки, уложенную на дно паза. Нижний и верхний слой лобовых частей изображают соответственно пунктирными и сплошными линиями.

Стрелки на элементах обмотки, проставленные на некоторых схемах, показывают направление э. д. с. или токов в соответствующих элементах обмотки в определенный (один и тот же для всех фаз обмотки) момент времени.

Начала и концы фаз обмотки статора обозначают: начало 1–й фазы С1, 2–й фазы С2, 3–й фазы С3, конец 1–й фазы С4, 2–й фазы С5, 3–й фазы С6.

Для составления схемы обмотки помимо указания ее вида должны быть даны определяющие ее. параметры: Z – число пазов; $2p$ – число полюсов; y – шаг обмотки по пазам; a – число параллельных ветвей в фазе; Y (звезда) или △ (треугольник) – способы соединения фаз.

Однослойные обмотки.

Однослойные обмотки подразделяются на концентрические и шаблонные. На рис. 2 представлена трехфазная схема однослойной концентрической обмотки статора для четырехполюсного электродвигателя, число пазов которого Z = 36 и фазы обмотки соединены в звезду. При составлении схемы руководствуются следующими соображениями. Полюсное деление составляет:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

Число пазов на полюс и фазу равно:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

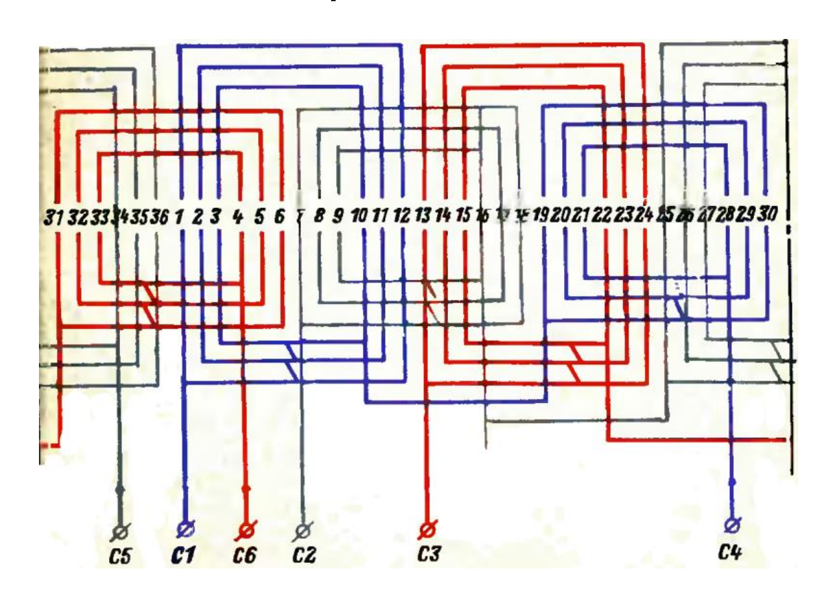


Рис. 2. Схема однослойной концентрической обмотки. $2p$ = 4, Z = 36.

В соответствии с этим первую катушечную группу, состоящую из трех катушек, закладывают левыми сторонами катушек в пазы 1, 2 и 3, а правыми сторонами – в пазы 10, 11 и 12. Началом первой фазы С1 принимают вывод из левой стороны катушки, заложенной в паз 1. Заключенные между сторонами первой катушечной группы пазы 4–9, а также пазы 13 – 18 займут катушки двух других фаз. Таким образом, следующая катушечная группа первой фазы займет левыми сторонами катушек пазы 19, 20 и 21, а правыми сторонами пазы 28, 29 и 30. Для правильного образования полюсов в однослойных обмотках (кроме обмоток, выполненных "вразвалку"), т. е. в обмотках, где число катушечных групп в фазе равно числу пар полюсов, они должны соединяться разноименными концами (конец первой катушечной группы с началом второй, конец второй катушечной группы с началом третьей и т. д.).

Исходя из этого, соединяют между собой концы катушек, выходящие из пазов 10 и 19. При этом соединении двух катушечных групп оставшийся свободным вывод из правой стороны катушки, заложенной в паз 28, является выводным концом первой фазы С4.

Начало второй фазы сдвигают от начала первой фазы обычно на 120 эл. град., т, е. на ⅔ полюсного деления. Здесь же следует отметить, что этот сдвиг может быть произведен также на число электрических градусов, равное 120 + 360n, где n – любое целое число, и только в целях концентрации всех выводов на одном участке обмотки их сдвигают на минимально возможное расстояние, на 120 эл. град.

Начало второй фазы С2 должно быть сдвинуто на ⅔ × τ, т. е. на ⅔ × 9 = 6 пазов, т. е. располагается в 6 + 1 = 7 пазу.

Следовательно, первая катушечная группа второй фазы займет левыми сторонами катушек пазы 7, 8 и 9, а правыми сторонами – пазы 16, 17 и 18. Пазы 19 – 24 займут катушки других фаз, а вторая катушечная группа второй фазы займет левыми сторонами катушек пазы 25, 26 и 27 и правыми сторонами пазы 34, 35 и 36. Катушечные группы второй фазы соединяют между собой концами катушек, выходящих из пазов 16 и 25. Оставшийся свободным вывод из правой стороны катушки, заложенный в паз 34, является выводным концом второй фазы С5. Начало третьей фазы С3, сдвинутое от начала второй фазы па ⅔ полюсного деления, располагают в пазу 13. В первой катушечной группе третьей фазы левые стороны катушек займут пазы 13, 14 и 15, а правые стороны– пазы 22, 23 и 24. Вторая катушечная группа этой фазы располагается левыми сторонами катушек в пазах 31, 32 и 33 и правыми сторонами в пазах 4, 5 и 6. Соединяют между собой катушечные группы концами, выходящими из пазов 22 и 31. Свободный вывод, выходящий из правой стороны катушки, заложенной в паз 4, является выводным концом третьей фазы С6. Для соединения фаз в звезду соединяют выводы С4, С5 и С6. Чтобы проверить правильность образования полюсов, следует указать стрелками направление токов на входных концах фаз С1, С2 и С3.
Как следует из векторной диаграммы фазных токов трехфазной системы, в любой момент времени направление тока в начале одной из фаз обмотки всегда противоположно направлению токов в началах двух других фаз.
Сообразуясь с этим, проставляют на линии пазов стрелки, показывающие направление тока в сторонах катушек, что и определит правильность образования полюсов в обмотке – их число и чередование, а также правильность соединения фаз между собой.
В однослойной концентрической обмотке шаги катушек в катушечной группе разные: в наружной (самой большой) катушке шаг составляет $4q$ – 1, а во внутренней (самой малой) шаг равен $2q$ + 1. Средний же шаг всех катушек, входящих в катушечную группу, который является расчетным при определении э. д. с. обмотки, составляет:

$$\frac{(4q-1)+(2q+1)}{2} = 3q = \frac{Z}{2p}$$

т. е. является диаметральным.

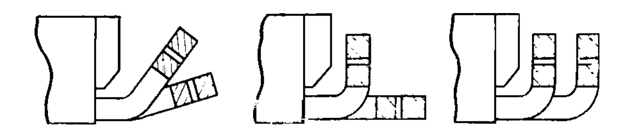


Рис. 3. Расположение лобовых частей двухплоскостной концентрической обмотки.

В некоторых электродвигателях старых выпусков напряжением 500 В с однослойной всыпной обмоткой, а также в близкой к ней по конструкции так называемой "протяжной" обмоткой применялась дополнительная изолировка лобовых частей каждой катушечной группы, и они различались по способу расположения лобовых частей. Обмотку, изображенную на рис. 2, называют двухплоскостной, так как в ней лобовые части расположены в двух плоскостях. Возможные виды взаиморасположения лобовых частей 1–й и 2–й плоскостей указаны на рис. 3.
В однослойной обмотке число катушечных групп в фазе равно числу пар полюсов р; следовательно, число катушечных групп всей обмотки будет $3p$, т. е. $3p/2$ малых (1–й плоскости) катушечных групп и $3p/2$ больших (2–й плоскости) катушечных групп. Число $3p/2$ может быть целым тогда, когда p четное, т. е. когда число полюсов обмотки $2p$ равно 4, 8, 12, 16 и т. д. Это значит, что только при числе полюсов машины из указанного ряда вся двухполюсная обмотка может быть распределена на три фазы с равным числом больших и малых катушечных групп в каждой фазе, как это имело место в обмотке, приведенной на рис. 2, или в обмотке, приведенной на рис. 4 для восьмиполюсной машины.

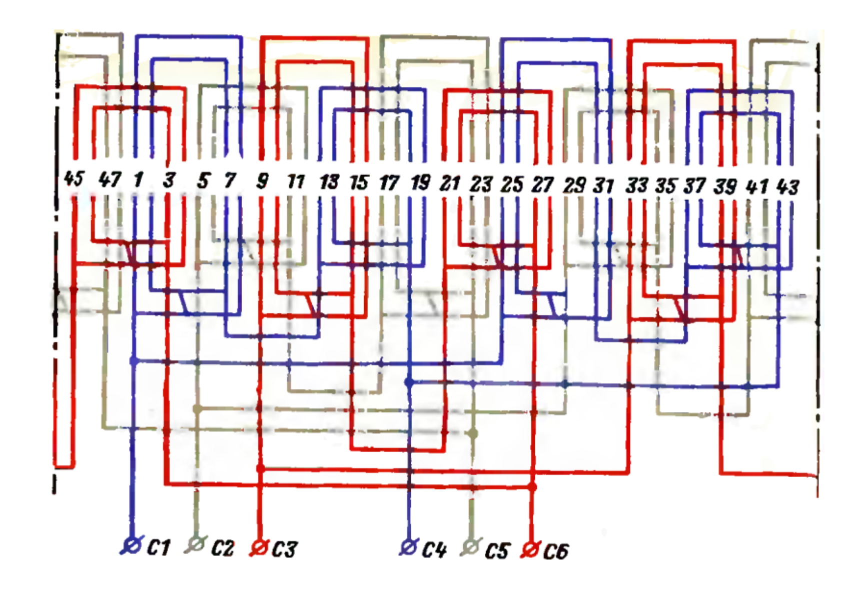


Рис. 4. Схема двухплоскостной концентрической обмотки. $2p = 8$, $Z = 48$, $a = 2$.

В том же случае, когда число пар полюсов машины нечетное, т е. $2p$ равно 6, 10, 14, 18 и т. д., двухплоскостная обмотка не может быть распределена по фазам с одинаковым количеством больших и малых катушечных групп. Она должна иметь так называемую "переходную" катушечную группу, как бы наполовину находящуюся в первой плоскости, наполовину – во второй. Схема такой обмотки для шестиполюсной машины приведена на рис. 5.

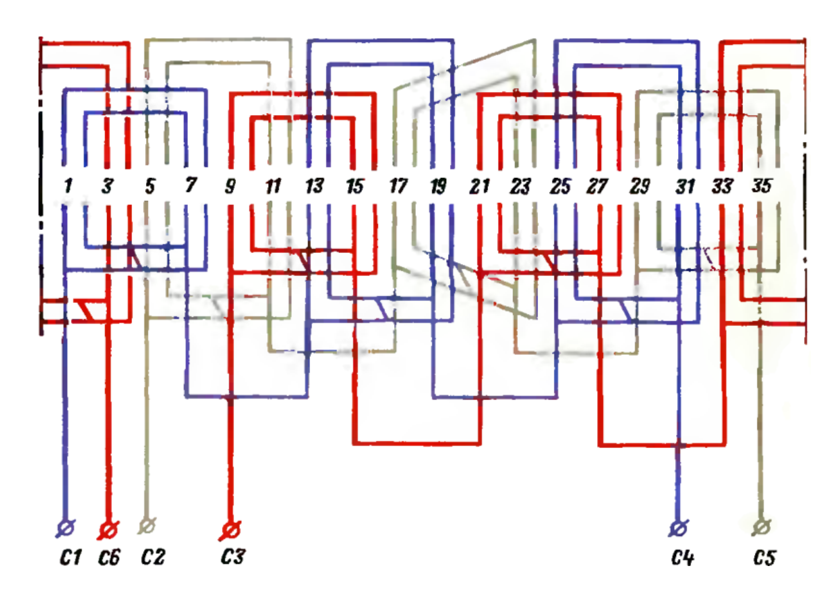


Рис. 5. Схема обмотки с переходной катушечной группой. $2p = 6$; $Z = 36$.

Если еще раз обратиться к рис. 2 и 4, то легко установить, что обмотка на рис. 2 имеет последовательное соединение катушечных групп в фазе, а обмотка на рис. 4 – соединение в две параллельные ветви. По общему принципу образования параллельных ветвей последние должны иметь одинаковые индуктивные и активные сопротивления для обеспечения равенства проходящих по ним токов. Следовательно, обмотка, изображенная на рис. 2, при соединении в две параллельные ветви имела бы неодинаковые активные сопротивления, так как в одну параллельную ветвь входила бы малая катушечная группа, а в другую – большая с разными длинами лобовых частей и, следовательно, разными активными сопротивлениями. Что касается схемы, изображенной на рис. 4, то здесь в каждую параллельную ветвь входит по одной малой и одной большой катушечной группе и следовательно соблюден принцип одинаковости активных сопротивлений.

Если же эту обмотку соединить в четыре параллельные ветви, то этот принцип был бы нарушен, обмотка получалась бы с разными активными сопротивлениями в параллельных ветвях.

Следует заметить, что в асинхронных электродвигателях активное сопротивление фазы обмотки составляет обычно не более 10–12% полного сопротивления, которое в основном зависит от индуктивного сопротивления. И если учесть, что за счет различной длины прямолинейных вылетов большой и малой катушечных групп разница в их активных сопротивлениях будет также примерно 10–12%, то разница в полных сопротивлениях параллельных ветвей (при условии равенства их индуктивных сопротивлений) и, следовательно, токов в них составит около 1% , что практически не может повлиять на работу электродвигателя. Это положение служит объяснением применения для двухполюсных электродвигателей трехплоскостных обмоток с различными длинами катушечных групп в фазах и соответственно различными активными сопротивлениями фаз обмотки (см. рис. 7).

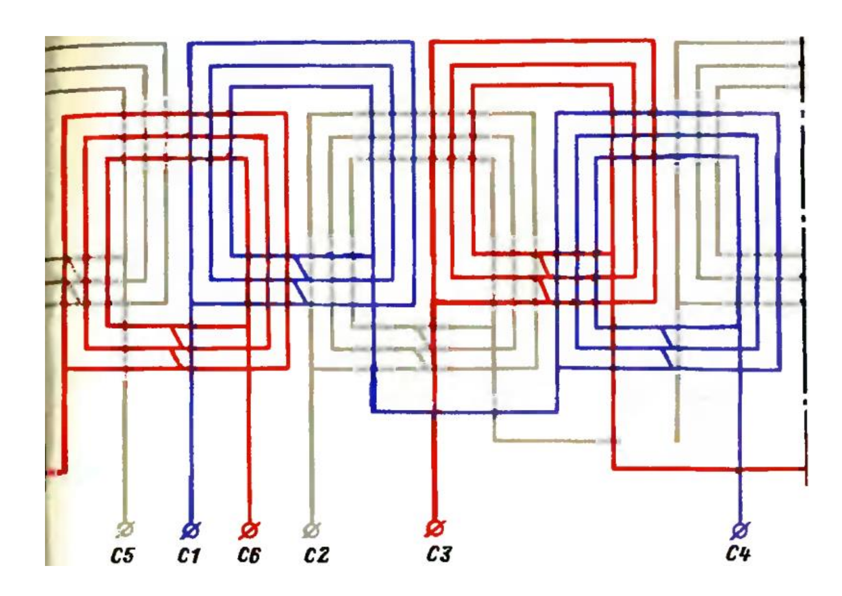


Рис. 6. Схема двухплоскостной концентрической равнокатушечной обмотки.
$2p = 4$, $Z = 36$.

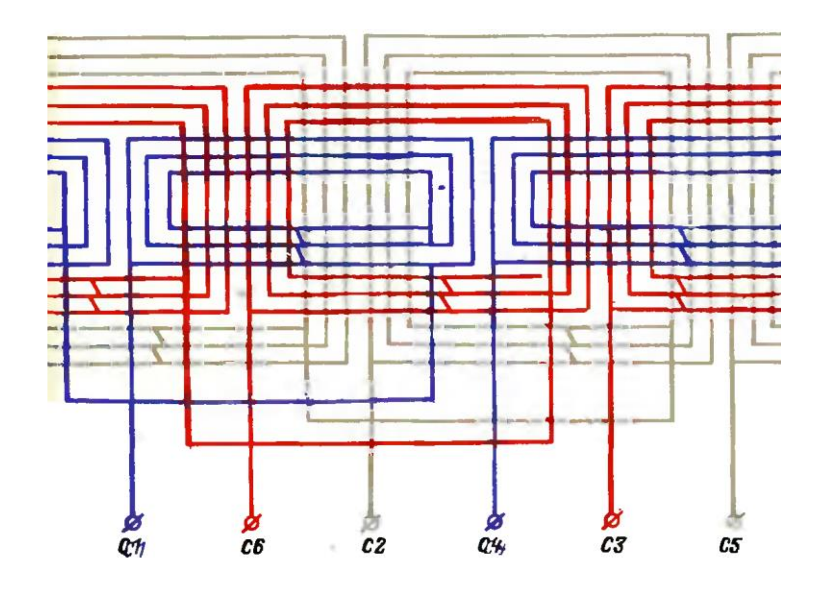


Рис. 7. Схема трехплоскостной концентрической обмотки "вразвалку".
$2p = 2$, $Z = 36$, $a = 1$.

На рис. 6 изображена схема обмотки для четырехполюсного электродвигателя, точно такого же, для которого была ранее представлена схема на рис. 2.

Различие этих схем состоит в том, что обмотка на рис. 6 состоит из одинаковых катушечных групп ("равнокатушечная"). При соединении этой обмотки в две параллельные ветви не будет разницы в активном сопротивлении параллельных ветвей и если в обыкновенной однослойной обмотке число видов катушек будет равно $2q$, то в равнокатушечной обмотке это число будет только q.
На рис. 7 представлена иногда применявшаяся для электродвигателей старых выпусков, для двухполюсных машин схема трехплоскостной обмотки (лобовые части обмотки располагаются в трех плоскостях). Как видно из рис. 7, лобовые части первой фазы обмотки располагаются только в 1–й плоскости, второй фазы – только во 2–й плоскости и третьей фазы – только в 3–й плоскости.
Таким образом, как об этом уже упоминалось, активные сопротивления фаз в этой обмотке различны. Другой особенностью этой схемы является то, что катушечная группа, состоящая из шести катушек (q = 6), разбита на две концентрические полугруппы по три катушки в каждой, т. е. катушечная группа как бы развалена надвое. Отсюда такую обмотку часто называют намотанной "вразвалку".
Способу намотки "вразвалку" применяют для электродвигателей с большим числом полюсов при числе пазов на полюс и фазу q равном шести или восьми и реже при q, равном четырем. Обмотка со сравнительно большим числом q, спроектированная "вразвалку", дает возможность уменьшить радиальные размеры корпуса электродвигателя за счет небольшого увеличения ее аксиальных размеров, что в результате приводит к снижению общей массы электродвигателя.
Основные положения, которыми следует руководствоваться при составлении схемы однослойной концентрической обмотки, следующие:
1. Исходя из технологических условий заготовки и укладки катушек, а также условий эксплуатации электродвигателя, выбирают тип обмотки (двух– или трехплоскостная, разно– или равнокатушечная).
2. Определяют число катушек в катушечной группе, равное числу q.
3. Определяют шаг катушек по пазам. Шаг большой (внешней) катушки в катушечной группе равен 4 q = 1. Например, в обмотке с q = 4 шаг внешней катушки равен 15, или, как принято обозначать, шаг 1 – 16. Шаг каждой следующей внутренней катушки уменьшается на два пазовых деления, т. е. составит 1 – 14, 1 – 12 и 1 – 10.
4. Определяют, возможно ли соединить проектируемую обмотку в требуемое число a параллельных ветвей. Для этого необходимо, чтобы частное p/a было целым числом.
5. Расставляют направления токов под полюсами, образованными магнитным полем обмотки, соединяя при помощи межкатушечных соединений отдельные катушки в катушечные группы и при помощи межгрупповых – катушечные группы в фазы; при этом выбранное направление тока в фазе должно соответствовать стрелкам во всех катушках фазы.
6. Выбирают катушки, из которых должны выходить начала и концы фаз обмотки. Для проверки правильности определения начал и концов фаз следует воспользоваться правилом о направлении токов в фазах, о котором уже упоминалось.
Шаблонные обмотки можно подразделить на простую шаблонную обмотку, шаблонную обмотку "вразвалку" и цепную обмотку.
На рис. 8 приведена полная развернутая схема простой шаблонной обмотки двухполюсного электродвигателя при q = 3. Из этой схемы видно, что катушки шаблонной обмотки (это относится ко всем типам шаблонных обмоток) имеют трапецеидальную форму. Одна пазовая часть катушки – длинная, другая – короткая. Лобовые части катушек при этом располагаются в двух плоскостях. Как видно из схемы, образование катушечных групп и фаз обмотки, определение начал и концов фаз производятся так же, как и в концентрической обмотке. Положительным качеством этой обмотки является то, что все катушки совершенно одинаковы по форме.

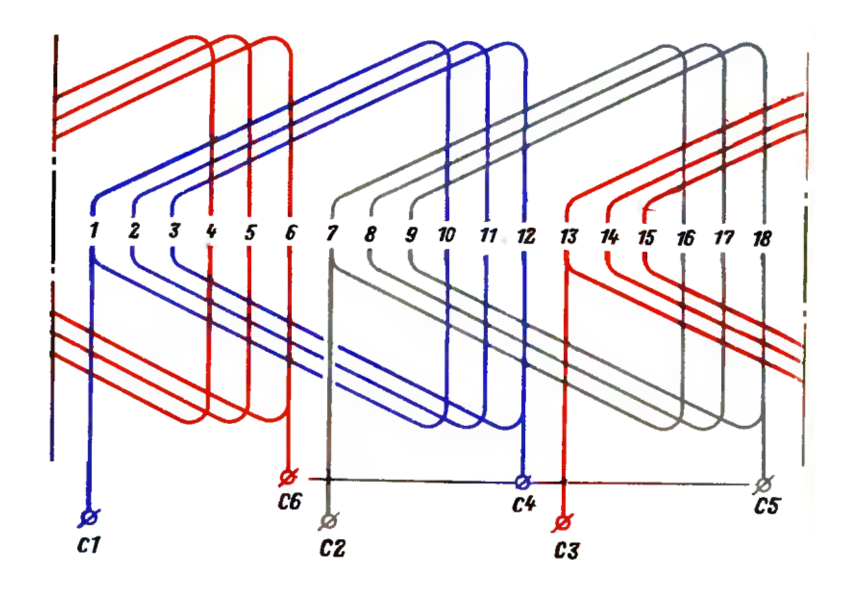


Рис. 8. Схема простой шаблонной обмотки. $2p = 2$, $Z = 18$, $y = 9$.

Шаблонная обмотка, так же как и концентрическая, может быть выполнена способом "вразвалку". На рис. 9 изображена схема шаблонной обмотки "вразвалку" для двухполюсного электродвигателя при $Z = 24$. Схему на рис. 9 можно рассматривать как промежуточную между шаблонной обмоткой "вразвалку" и так называемой цепной обмоткой. Цепные обмотки также выполняют "вразвалку". Отличие же их от предыдущих обмоток заключается в том, что в них короткие и длинные стороны катушек чередуются, т. е. "развалка" производится не по полугруппам, а по катушкам.

На рис. 10 и 11 представлены схемы цепных обмоток соответственно для шести– и четырехполюсного электродвигателя. Для наглядности эти схемы представлены в виде кольцевой развертки.

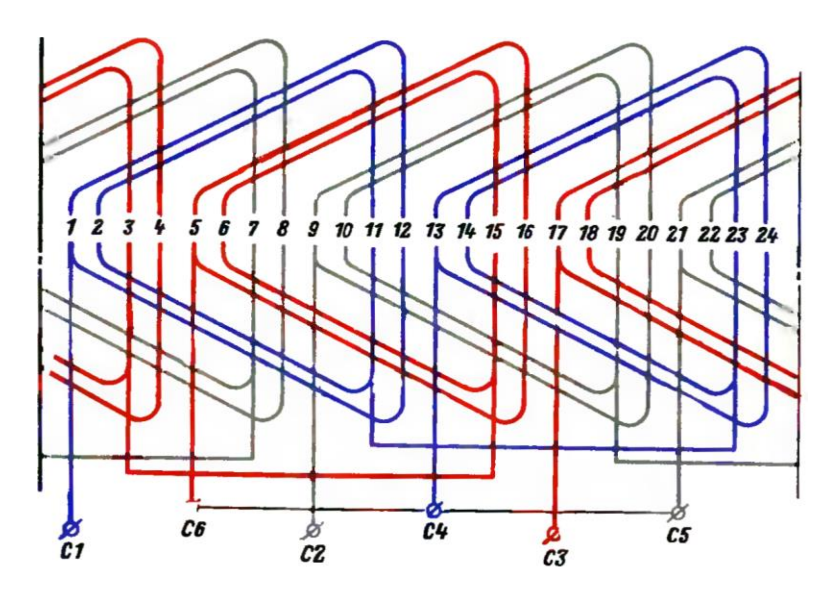


Рис. 9. Схема шаблонной обмотки "вразвалку". $2p = 2$, $Z = 24$, $q = 4$, $y = 11$ и 9.

Рассматривая эти схемы, мы можем заметить, что если короткие стороны катушек лежат в нечетных пазах, то длинные стороны лежат в четных. Но так как каждая катушка состоит из короткой и длинной стороны, то *цепную обмотку можно образовать только в том случае, если ее шаг будет нечетным*.

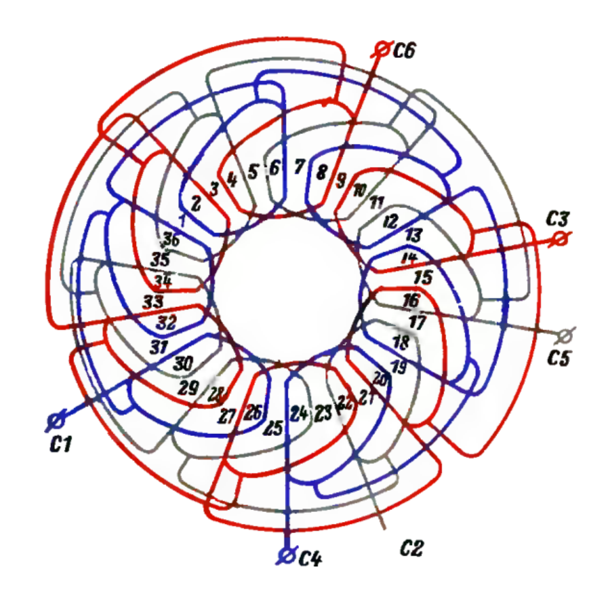


Рис. 10. Схема цепной обмотки.
2p = 6, Z = 36, q = 2, y = 5.

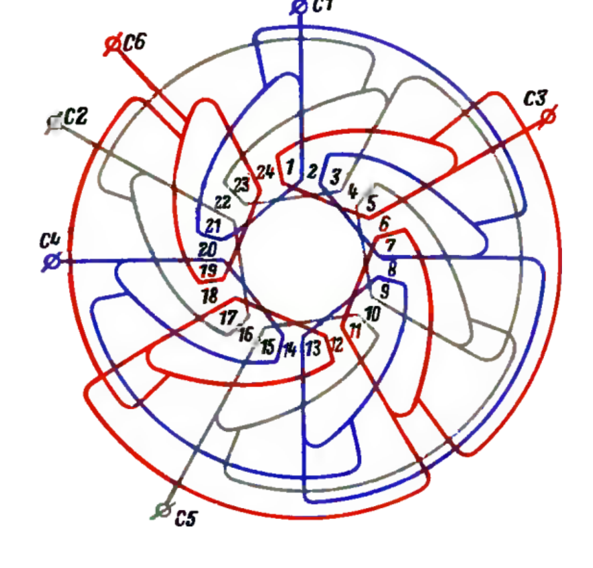


Рис. 11. Схема цепной обмотки.
$2p$ = 4, Z = 24, q = 2, y = 5.

Важно также отметить, что обмотки, изображенные на рис. 10 и 11, выполнены с укороченным шагом катушек по пазам. На той и другой схеме шаг равен пяти, в то время как диаметральный шаг этих обмоток равен:

$$\text{для рисунка 10: } \frac{Z}{2p} = \frac{36}{6} = 6 \quad \text{для рисунка 11: } \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

Таким образом, цепная обмотка может быть выполнена с укороченным шагом, что дает экономию меди в лобовых частях.

Двухслойные обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу.

Наибольшее распространение в статорах электродвигателей переменного тока имеют двухслойные петлевые обмотки. Двухслойной обмотки одинаковы, что упрощает и удешевляет их изготовление, название "двухслойная" обмотка получила потому, что в паз закладываются стороны двух катушек, а каждая катушка располагается на статоре в двух слоях. Один слой обмотки укладывается на дне паза ("нижний" слой"), а другой – в части паза, прилегающей к расточке статора ("верхний" слой). Лобовые части катушки также занимают два слоя, а переход из одного слоя в другой осуществляется в головках катушек. По своим электрическим признакам двухслойные петлевые обмотки имеют следующие преимущества:
возможность применения катушек с любым укорочением шага, причем шаг катушки может быть как четным, так и нечетным;
сравнительно несложное выполнение обмотки с числом пазов на полюс и фазу любой дробности;
возможность применения разновитковых катушек для полного использования площади пазов статора, если в результате электромагнитного расчета окажется, что полное число активных проводников в пазу должно быть нечетным.
Перечисленные качества двухслойной петлевой обмотки обеспечивают преимущественное применение ее для статоров асинхронных электродвигателей. В качестве примера, пользуясь принятыми нами ранее условными графическими и буквенными обозначениями, приводится схема двухслойной обмотки со следующими параметрами (рис. 12): $2p$ = 8, Z = 48, y = 5, a = 1.

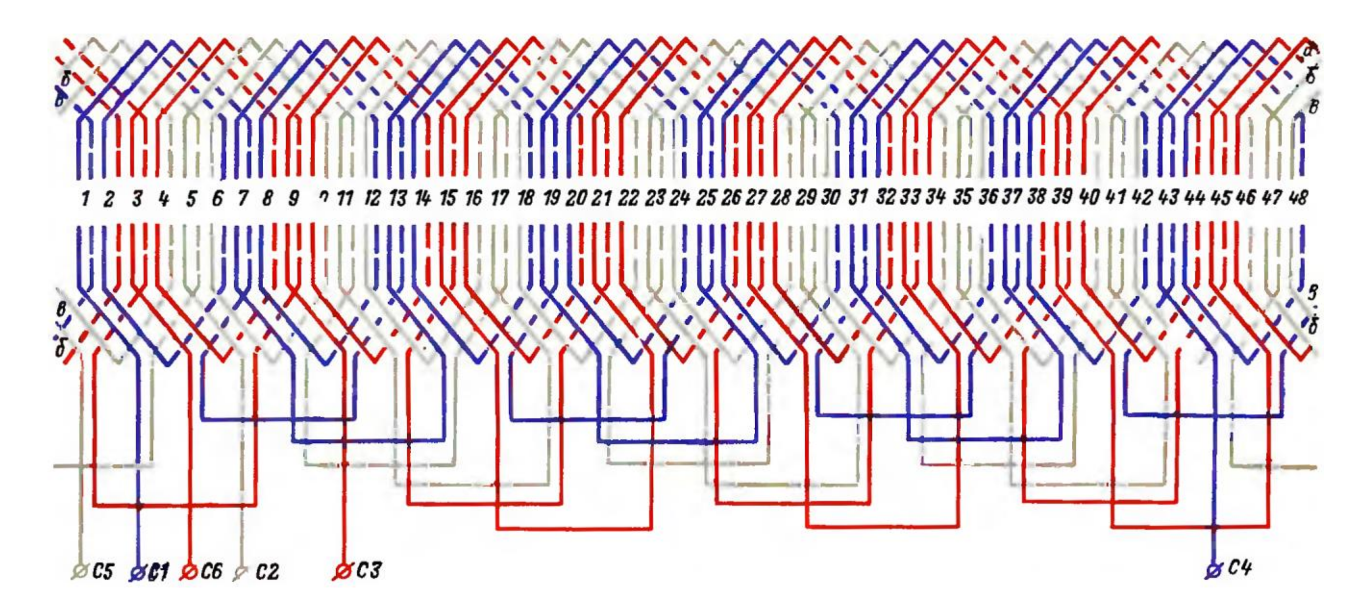


Рис. 12. Схема двухслойной обмотки. $2p = 8$, $Z = 48$, $y = 5$, $a = 1$.

Так как диаметральный шаг этой обмотки, равный полюсному делению:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{48}{8} = 6$$

то коэффициент укорочения обмотки:

$$ky = \frac{y}{\tau} = \frac{5}{6}$$

Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{48}{8 \times 3} = 2$$

В соответствии с этим 1–ю катушечную группу, состоящую из двух катушек, закладывают верхними сторонами катушек в пазы, условно обозначенные 1 и 2, нижними сторонами в пазы 6 и 7. Началом первой фазы С1 принимают вывод катушки из верха первого паза. Верх пазов 3, 4, 5 и 6 и низ пазов 8, 9, 10 и 11 займут соответственно катушечные группы других двух фаз.

Таким образом, следующая катушечная группа первой фазы займет своими верхними сторонами пазы 7 и 8, а нижними – пазы 12 и 13.

Остальные катушечные группы первой фазы займут: верхними сторонами катушек пазы 13 и 14, 19 и 20, 25 и 26, 31 и 38, 43 и 44, нижними сторонами катушек пазы 18 и 19, 24 и 25, 30 и 31, 36 и 37, 42 и 43,48 и 1.

Для правильного образования полюсов катушечные группы при последовательном соединении (в нашем случае $a = 1$) соединяют между собой одноименными выводами. При соединении таким способом всех катушечных групп первой фазы получится свободный вывод из верха катушки, заложенной в паз 43. Этот вывод и является выводным концом первой фазы С4. Начало второй фазы сдвигают от начала первой фазы, если q – целое число, на 120 эл. град., или на ⅔ полюсного деления. Так как полюсное деление τ = 6, то начало второй фазы сдвигают на ⅔ × 6 = 4 паза, т е. располагают в 5–м пазу (4 + 1). Аналогично этому начало третьей фазы располагают в пазу 9. Концы второй и третьей фазы, также сдвинутые от конца первой фазы на ⅔ × τ, находятся соответственно в пазах 47 и 3.

Обращает на себя внимание, что в одном пазу каждого полюса (пазы 6, 12, 18 и т. д.) имеет место встречное направление токов в верхней и нижней сторонах катушек. Это является следствием принятого укорочения шага обмотки на один паз. (Принят шаг, равный пяти, по сравнению с диаметральным шагом, равным шести.)

При укорочении на два паза по отношению к диаметральному, встречное направление токов будет уже в двух пазах каждого полюса.

В этом легко убедиться, если составить схему, отличающуюся от приведенной на рис. 12 только шагом обмотки 1–5 (вместо 1–6), и обозначить стрелками направления токов во всех элементах обмотки. При диаметральном шаге обмотки не будет встречных направлений токов в одном и том же пазу.

Как указывалось, в зависимости от расчетных данных катушечные группы в фазе могут быть соединены между собой последовательно или параллельно (в две или несколько параллельных ветвей).

На рис. 13 приведена схема обмотки с параметрами, аналогичными параметрам обмотки на рис. 12, по при соединении катушечных групп в две параллельные ветви (a = 2).

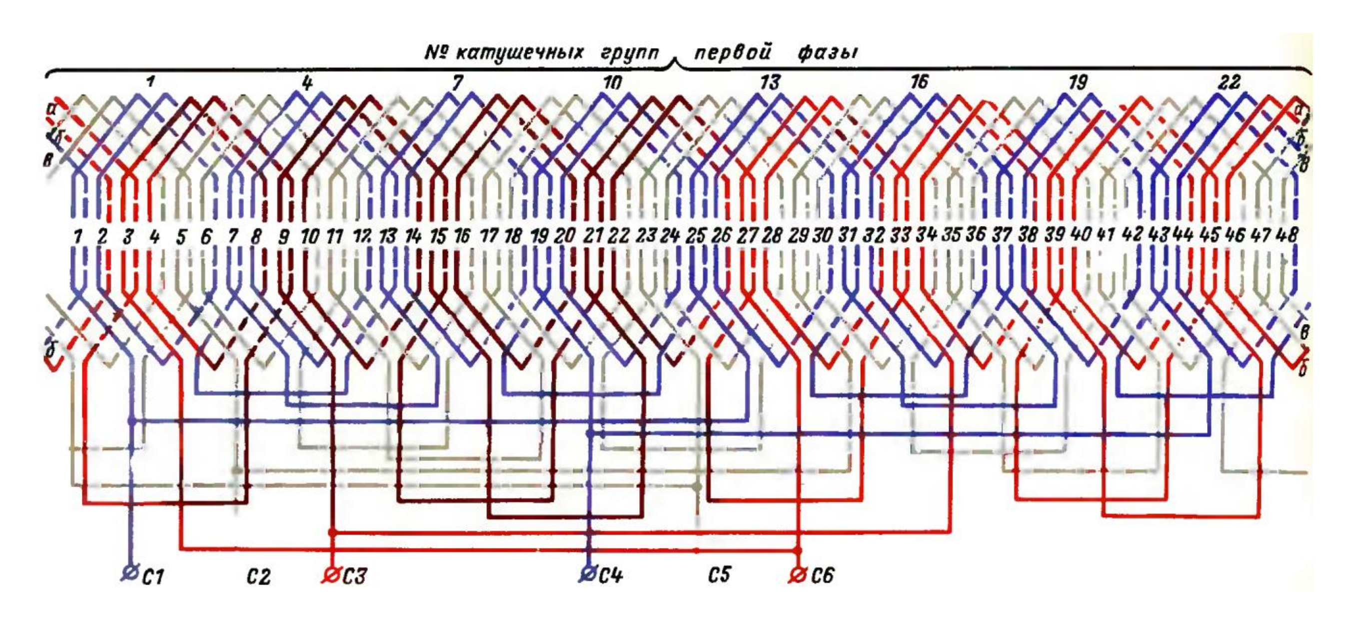


Рис. 13. Схема двухслойной обмотки. $2p$ = 8, Z = 48, y = 5, a = 2.

Возможное число параллельных ветвей, a обмотки с целым числом пазов па полюс и фазу определяется требованием, по которому отношение $2p/a$ должно выражаться целым числом, так как указанное отношение разно числу катушечных групп, приходящихся на каждую параллельную ветвь, а это число, естественно, не может быть дробным Отсюда следует, что число параллельных ветвей может быть равно 1; 2; p и $2p$ при любом числе полюсов машины.

Число параллельных ветвей может быть равно $p/2$, $p/3$, $p/4$, ...p/n только в обмотках, число полюсов которых делится соответственно на 4, 6, 8, ..., $2n$, т. е. число параллельных ветвей может быть равно:

$p/2$ для обмоток имеющих 4, 8, 12, 16 полюсов и т. д.
$p/3$ для обмоток имеющих 6, 12, 18, 24 полюсов и т. д.
$p/4$ для обмоток имеющих 8, 16, 24, 32 полюсов и т. д.
$p/5$ для обмоток имеющих 10, 20, 30, 40 полюсов и т. д.
$p/6$ для обмоток имеющих 12, 24, 36, 48 полюсов и т. д.

Двухслойные обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу.

Выше упоминалось, что одним из важнейших преимуществ двухслойной петлевой обмотки является практическая возможность выполнения обмотки с числом пазов на полюс и фазу любой дробности.

Представим себе такой случай. Асинхронный электродвигатель с параметрами обмотки статора Z = 72; $2p$ = 12, a = 1 при ремонте модернизируется с увеличением мощности за

счет повышения его номинальной частоты вращения (синхронной) с *nc* = 500 *об/мин*. (2*p* = 12) до *nc* = 600 *об/мин*. (2*p* = 10).
До модернизации:

$$q = \frac{Z}{3 \times 2p} = \frac{72}{3 \times 12} = 2$$

после модернизаций:

$$q = \frac{72}{3 \times 10} = 2\tfrac{2}{5}$$

Как указывалось, число q определяет число катушек в катушечной группе. Дробное q означает, что в обмотке не все катушечные группы одинаковы. Одни из них состоят из большого числа катушек и называются большими катушечными группами, другие – с меньшим числом катушек, называются малыми.
В общем случае дробное число пазов на полюс и фазу представляется в виде целого числа и правильной дроби:

$$q = b + \frac{c}{d}$$

Для нашего примера: b = 2, c = 2, d = 5.
При составлении схемы часть катушечных групп комплектуется из b + 1 катушек (большие катушечные группы), а часть из b катушек (малые катушечные группы). Количество больших и малых катушечных групп в каждой фазе, а, следовательно, и во всей обмотке определяется дробной частью (c/d) числа q. В применении к выбранному нами примеру на каждые d = 5 катушечных групп во всей обмотке (также и в фазе) приходится c = 2 больших катушечных групп, состоящих из b + 1 = 3 катушек и d – c = 3 малых катушечных групп, состоящих из b = 2 катушек.
Для выполнения схемы обмоток остается только определить порядок чередования больших и малых катушечных групп по окружности статора.
Так как на каждые d катушечных групп по всей окружности статора будет приходиться c и d – c соответственно больших и малых, то первые d катушечных групп называют периодом чередования и записывают (по данным нашего примера): (2 3 2 3 2); пли в любом другом распределении: (2 2 2 3 3), (2 3 3 2 2), (3 2 2 2 3) и т. д. Выбрав какое–либо распределение для периода чередования, повторяют его столько раз, сколько число d содержится в полном количестве катушечных групп всей обмотки, т. е.:

$$\frac{3 \times 2p}{d}$$

Для выбранного нами примера период чередования повторяется:

$$\frac{3 \times 10}{5} = 6 \text{ раз.}$$

и полное чередование катушечных групп по окружности статора примет вид:

(2 3 2 3 2) (2 3 2 3 2) (2 3 2 3 2)
(2 3 2 3 2) (2 3 2 3 2) (2 3 2 3 2)

Практически для полной характеристики чередования катушечных групп всей обмотки достаточно записать (2 3 2 3 2) и т. д.
На рис. 14 приведена схема соединений обмотки с q = 1½, в которой группы из двух и одной катушек чередуются между собой.
Распределение больших и малых катушечных групп внутри периода чередования может быть совершенно произвольным. Любое из приведенных выше в нашем примере распределений обеспечивает правильное выполнение схемы обмотки. Практически принято распределять большие и малые катушечные группы внутри периода чередования по возможности равномерно.

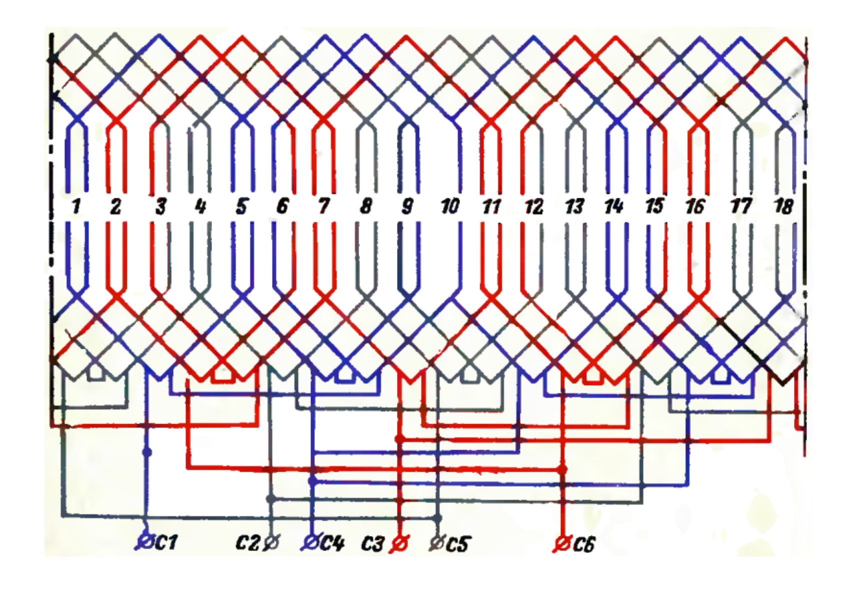


Рис. 14. Схема двухслойной обмотки. $2p = 4$, $Z = 18$, $q = 1½$.

Исходя из этого положения, рекомендуем наиболее простой, проверенный практикой способ определения чередований для двухслойных петлевых обмоток с числом q любой дробности. Так, например, требуется составить чередование катушечных групп по окружности статора при $q = 2^3/_{10}$. По виду дроби определяем, что чередование будет состоять из семи двухкатушечных и трех трехкатушечных групп. Выписываем строчку из семи двоек:

22 ↑ 22 ↑ 22 ↑ 2

Стараясь по возможности равномерно распределить большие и малые катушечные группы, в промежутки, указанные стрелками, вставляем тройки; получаем законченное чередование:

(2 2 3 2 2 3 2 2 3 2)

Если $q = 2^7/_{10}$, то трехкатушечных групп будет больше, чем двухкатушечных. Поэтому первую строчку составляем из семи троек, а между ними расставляем двойки.
Необходимость проверки приемлемости выбранного распределения катушечных групп внутри периода чередования может возникнуть лишь в том случае, если в составляемой схеме необходимо выполнить параллельные ветви. Число возможных параллельных ветвей в двухслойных петлевых обмотках с дробным q определяется из соотношения:

$$\frac{2p}{a \times d} = \text{целому числу.}$$

Все сказанное выше о трехфазных обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу справедливо для всех значений q, кроме тех, когда знаменатель дробности a равен или кратен 3. В этом последнем случае получается так называемая несимметричная трехфазная обмотка, где фазные напряжения не одинаковы по величине и сдвинуты относительно друг друга на угол не точно равный 120 или 240°.

3. Расчеты обмоток.

Электродвигатели, поступающие в ремонт, как правило, имеют заводской паспортный щиток (паспортную табличку) и обмотку, сохранившуюся в такой степени, что возможно безошибочно определить обмоточные данные электродвигателя. В этом случае, если при ремонте не требуется изменить параметры электродвигателя (напряжение и частоту вращения), имеются требуемые провода и

электроизоляционные материалы, и кроме того обмоточные данные электродвигателя совпадают с содержащимися в опубликованных альбомах, которыми обычно располагают электроремонтные цехи, нет надобности производить какие–либо расчеты; при ремонте полностью повторяется заводское исполнение обмотки.

Если не сохранился заводской паспортный щиток и даже отсутствует обмотка электродвигателя, следует измерить внешний и внутренний диаметры и длину сердечника статора и ротора, определить форму, размеры и число пазов в сердечниках и попытаться найти в альбоме обмоточных данных тип электродвигателя, соответствующие данные которого полностью совпадали бы с замеренными. Если таким способом будет точно установлен тип электродвигателя, то также нет надобности производить расчет обмотки, ее следует выполнить по данным, относящимся к выявленному типу электродвигателя.

В тех же случаях, если электродвигатель очень старого выпуска и его нет в альбоме обмоточных данных или он изготовлен иностранной фирмой, то расчет обмотки не обходим, даже если в нем частично или полностью сохранилась обмотка. Это объясняется тем, что электродвигатель мог ранее ремонтироваться с отступлениями от заводского исполнения, причем эти отступления могли быть недопустимыми и даже послужить причиной выхода электродвигателя из строя. Расчетным путем (поверочным расчетом) устанавливается, соответствует ли обмотка паспортным данным электродвигателя и находятся ли в норме его электромагнитные нагрузки.

Расчет обмотки также необходим: при изменении параметров электродвигателя – для определения обмоточных данных, обеспечивающих новые измененные параметры, при изменении заполнения паза из–за отсутствия электроизоляционных материалов и провода требуемых размеров и марок, а также при необходимости изменения числа витков, заложенных в паз.

Расчетом оценивается влияние указанных изменений на мощность электродвигателя,
при изменении материала провода (замене медного провода на алюминиевый). Расчетом оценивается влияние указанной замены на мощность электродвигателя. Для электродвигателей, которых нет в альбоме обмоточных данных при отсутствии заводского паспортного щитка и полностью демонтированной обмотке необходим так называемый восстановительный расчет для определения параметров электродвигателя и установления обмоточных данных. Этот вид расчета, являющийся наиболее сложным, может дать только приближенное решение, которое должно уточняться по результатам испытания отремонтированного электродвигателя.

Поверочный расчет.

Длительным опытом проектирования и изготовления асинхронных двигателей установлены допустимые электромагнитные нагрузки для обмоток и активной стали и степень (коэффициент) заполнения паза обмоточным проводом. Целью проверочного расчета является вычисление указанных величин и сравнение их с допустимыми значениями. Если в результате расчета будет установлено, что электромагнитные нагрузки и коэффициент заполнения паза находятся в допустимых пределах, то можно считать, что обмоточные данные электродвигателя соответствуют его паспортному щитку. На основании паспортных и обмоточных данных, а также снятых с натуры размеров электродвигателя определяют следующие необходимые для расчета величины.

1. Число полюсов электродвигателя.

$$2p = \frac{120 \times f}{nc} \quad (1)$$

где: f – частота тока в питающей сети, Гц; nc – синхронная частота (скорость) вращения электродвигателя (частота вращения магнитного поля статора).

Для принятой в СССР для промышленных целей частоты тока 50 *гц*.

$$2p = \frac{6000}{nc} \quad (2)$$

На паспортном щитке электродвигателя указывается не синхронная частота вращения, а действительная *n*, отличающаяся от синхронной на величину скольжения. Скольжение при номинальной мощности электродвигателя выражается в процентах по отношению к синхронной скорости:

$$s = \frac{nc - n}{nc} \quad (3)$$

и составляет в зависимости от мощности электродвигателя 1,5 – 5%.
Таким образом, для определения числа полюсов следует частное от деления 6000 на число, указывающее частоту вращения, уменьшить на 1,5 – 5% до ближайшего целого четного числа.
2. Полюсное деление (*см*.).

$$\tau = \frac{\pi \times D}{2p} \quad (4)$$

где: D – внутренний диаметр статора (диаметр расточки), *см*.
3. Зубцовый шаг (*см*.).

$$t = \frac{\pi \times D}{Z} \quad (5)$$

где Z – число пазов статора.
4. Активная длина сердечника статора (*см*.)

$$l = kc \times (l1 - nk \times bk) \quad (6)$$

где: $l1$ – полная длина сердечника стали (включая радиальные вентиляционные каналы), *см*., nk – число вентиляционных каналов; bk – ширина вентиляционного канала, *см*., kc – коэффициент заполнения сердечника сталью, зависящий от толщины листов, вида межлистовой изоляции, а также учитывающий неплотное прилегание листов друг к другу. Для листов толщиной 0,5 *мм*. значение коэффициента kc составляет:

при изолировке бумагой	0,90
при лаковой изоляции	0,93
при оксидной изоляции или при отсутствии изоляции между листами	0,95

5. Площадь паза Qп (*см*^{2}).
Наиболее распространенные формы пазов приведены на рис. 15.

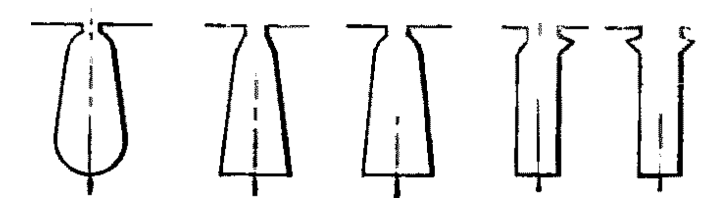


Рис. 15. Наиболее распространенные формы пазов.

6. Расчетная ширина зубца (*см*.).

$$b = \tfrac{2}{3}b' + \tfrac{1}{3}b'' \quad (7)$$

где: b'– ширина зубца в самом узком месте, b'' – ширина зубца в самом широком месте, *см*.

7. Высота спинки (*см.*)

$$hc = \frac{D1 - D}{2} - h\text{п} \quad (8)$$

где: $D1$ – наружный диаметр сердечника стали, см; hп – высота паза, *см*.
Как указывалось, задачей поверочного расчета является определение электромагнитных нагрузок и сравнение их с допустимыми.

Для статора характерными величинами являются:

$B\delta$ – индукция в воздушном зазоре, T;
Bc – индукция в спинке, T;
$B з$ – индукция в зубцах, T;
j – плотность тока, $A/мм^2$;
A – линейная нагрузка, $A/см.$;
kп – коэффициент заполнения паза.

Допустимые значения указанных величин в зависимости от мощности электродвигателя приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Наименование	Обознач.	Единица измер.	Мощность, *кВт*.			
			свыше 100	10–100	1–10	До 1
Индукция в воздушном зазоре	$B\delta$	T	1,0–0,9	0,9–0,7	0,7–0,6	0,6–0,3
Индукция в спинке	Bc	T	1,7–1,4	1,6–1,3	1,6–1,2	1,5–1,1
Индукция в зубцах	$B з$	T	2,0–1,8	1,8–1,4	1,6–1,4	1,5–1,3
Плотность тока в обмотке	j	$A/мм^2$	5–3	5,5–4	6–5	8–6
Линейная нагрузка	A	$A/см.$	350–600	250–400	200–300	150–200
Произведение плотности тока на линейную нагрузку	$j \times A$	$\frac{А^2}{мм^2 \times см.}$	2000		1700	
Коэффициент заполнения паза при однослойной обмотке	kп	–	0,45	0,43	0,40	0,37
Коэффициент заполнения паза при двухслойной обмотке	kп	–	0,42	0,40	0,37	0,35

Примечание. В электродвигателях с алюминиевой обмоткой электромагнитные нагрузки на 10 – 15% меньше, а коэффициент заполнения паза на 8 – 10% больше, чем в электродвигателях с медной обмоткой.

Если в результате поверочного расчета будет установлено, что электромагнитные нагрузки находятся в допустимых пределах, можно при ремонте полностью копировать старую обмотку. Большое расхождение вычисленных нагрузок с допустимыми может быть результатом ошибок, допущенных при предыдущем ремонте электродвигателя. Кроме того, не исключена возможность, что паспорт и обмоточные данные не соответствуют друг другу из–за того, что предыдущий ремонт электродвигателя производился с изменением номинальных параметров, но это не было отражено на заводском паспортном щитке.

Расчетные формулы.

1. Индукция в воздушном зазоре (T, тесла).

$$B\delta = \frac{2{,}5 \times p \times U\text{ф} \times a}{l1 \times Z \times D \times w\text{эп} \times k\text{о}} \times 10^2 \quad (9)$$

где: Uф – фазное напряжение, *в*, kо – обмоточный коэффициент (см. табл. 3).

$$U\text{ф} = U \text{ – при соединении фаз в треугольник; (10)}$$
$$U\text{ф} = U/\sqrt{3} \text{ – при соединении фаз в звезду (11)}$$

U – линейное напряжение, подводимое для питания электродвигателя;
wэп – число эффективных проводов в пазу:

$$w\text{эп} = \frac{6 \times w\text{эф} \times a}{Z} \quad (12)$$

где: wэф – число эффективных (последовательно соединенных) витков в фазе; a – число параллельных ветвей в фазе; kо – обмоточный коэффициент, величина которого зависит от числа пазов, приходящихся на полюс и фазу q, от шага обмотки y (табл. 3).

Таблица 3.

число катушек в катушечной группе	Сокращение шага обмотки в долях единицы										
	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,5
	Обмоточный коэффициент kо										
1	1,000	0,997	0,988	0,972	0,951	0,924	0,801	0,853	0,809	0,760	0,700
2	0,966	0,963	0,954	0,939	0,919	0,803	0,861	0,824	0,781	0,734	0,676
3	0,960	0,957	0,948	0,933	0,913	0,887	0,855	0,819	0,779	0,730	0,672
4	0,958	0,955	0,947	0,931	0,911	0,885	0,854	0,817	0,775	0,728	0,671
5–7	0,957	0,954	0,946	0,930	0,910	0,884	0,853	0,816	0,774	0,727	0,670
8	0,956	0,953	0,945	0,929	0,909	0,883	0,852	0,815	0,773	0,727	0,669
9 и более	0,955	0,952	0,944	0,928	0,908	0,882	0,851	0,815	0,773	0,726	0,668

Примечание. Для промежуточных значений сокращения шага обмоточный коэффициент определяется интерполяцией (см. стр 30)

2. Индукция в зубцах (T).

$$B\text{з} = B\delta \times \frac{t}{b} \times \frac{l1}{l} \quad (13)$$

3. Индукция в спинке (T).

$$B\text{с} = 0{,}55 \times B\delta \times \frac{D}{h\text{с}} \times \frac{l1}{l} \times \frac{1}{p} \quad (14)$$

4. Плотность тока ($A/\text{мм}^2$).

$$j = \frac{I\text{ф}}{Q\text{э} \times a} = \frac{I\text{ф}}{q\text{э} \times m1 \times a} \quad (15)$$

где: Qэ – сечение эффективного провода, мм^2; qэ – сечение элементарного проводника, мм^2; m – число элементарных проводников в эффективном проводе; Iф – номинальный ток в фазе, А: при соединении фаз в звезду:

$$I\text{ф} = \frac{P \times 1000}{\sqrt{3} \times U \times \eta \times cos\varphi} \quad (16)$$

при соединении фаз в треугольник:

$$I\text{ф} = \frac{P \times 1000}{3 \times U \times \text{η} \times cos\varphi} \quad (17)$$

где: P – номинальная мощность электродвигателя (мощность на валу), *кВт.*;
η – коэффициент полезного действия; cosφ – коэффициент мощности.
5. Линейная нагрузка ($A/см.$)

$$A = \frac{I\text{ф} \times Z \times w\text{эп}}{\pi \times D \times a} \quad (18)$$

6. Произведение $j \times A$ является одним из основных факторов, определяющих нагрев электродвигателя.
7. Коэффициент заполнения паза. Переходя к определению коэффициента заполнения паза, следует отметить, что в технической литературе по этому вопросу нет единообразия. Некоторыми авторами коэффициент заполнения паза определяется как отношение площади сечения всех изолированных проводов, заложенных в паз, ко всей площади паза.
Другими авторами он определяется как отношение площади сечения всех не изолированных проводов, заложенных в паз, к площади паза. Коэффициент заполнения паза определяется так же, как отношение площади сечения всех изолированных проводов, заложенных в паз, к свободному сечению паза (т. е. к площади паза за вычетом площадей, занимаемых клином, межслоевой прокладкой и пазовой изоляцией).
Нами принят первый способ, который менее точен, но более прост и практичен, т. е.:

$$k\text{п} = \frac{n \times q\text{эи}}{Q\text{п}} = \frac{w\text{эп} \times m1 \times q\text{эи}}{Q\text{п}} \quad (19)$$

где n – общее число проводников, заложенных в паз; qэи– сечение изолированного элементарного проводника.
Электродвигатели с короткозамкнутым ротором могут иметь ряд специфических ненормальностей из–за неправильного соотношения числа пазов статора, ротора и числа полюсов. Ненормальности заключаются в том, что электродвигатель может "прилипать", т. е. не приходить во вращение при подключении к сети, или, начав вращаться, застревает на некоторой скорости, обычно составляющей $^1/_7$ номинальной, или при вращении сильно гудит. Для избежания указанных явлений должны быть выдержаны следующие соотношения между числами пазов статора, ротора и полюсов:

$$\left.\begin{array}{l} Z' \neq Z \\ Z' \neq 0{,}5Z \\ Z' \neq 2Z \\ Z' \neq 6pk \\ Z' \neq 6pk + 2p \\ Z' \neq Z \pm p \\ Z' \neq Z + 2p \\ Z' \neq 0{,}5Z + 2p \\ Z' \neq 2Z + 2p \\ Z' \neq 6pk \pm 1 \\ Z' = 6pk \pm (2p \pm 1) \end{array}\right\} \quad (20)$$

где k– любое целое число от 1 до 4, Z' – число пазов ротора.

Расчет при изменении напряжения.

При переводе электродвигателя на новое напряжение при той же частоте вращения условием сохранения его мощности является неизменность индукций на всех участках магнитной цепи и объема тока в пазу.
Из формулы (9) при неизменной индукции в зазоре следует:

$$\frac{U\text{фс} \times a\text{с}}{w\text{эпс} \times k\text{ос}} = \frac{U\text{фн} \times a\text{н}}{w\text{эпн} \times k\text{он}}$$

Здесь и далее к обозначениям, относящимся к старому исполнению, добавляется индекс "с", к новому исполнению – индекс "н".
При сохранении типа и шага обмотки:

$$w\text{эпн} = w\text{эпс} \times \frac{U\text{фн}}{U\text{фс}}$$

Из формул (16) и (17) следует, что при сохранении плотности тока:

$$\frac{I\text{фн}}{I\text{фс}} = \frac{U\text{фс}}{U\text{фн}} = \frac{Q\text{эн}}{Q\text{эс}} \quad \text{или} \quad Q\text{эн} = Q\text{эс} \times \frac{U\text{фс}}{U\text{фн}}$$

Таким образом, при сохранении частоты вращения, плотности тока и мощности число эффективных проводов в пазу изменяется прямо пропорционально, а их сечение – обратно пропорционально новому и старому напряжению.
При увеличении числа проводов в пазу увеличивается объем, занимаемый изоляцией проводов. Поэтому по возможности приходится применять более толстые элементарные проводники, входящие в эффективный провод, или обмоточные провода с более тонкой изоляцией. Иногда приходится прибегать к уменьшению числа параллельных ветвей в фазе и тем самым увеличивать сечение провода в каждой из параллельных ветвей.
Однако упомянутые мероприятия по увеличению коэффициента заполнения паза не всегда можно осуществить, или эффект их может оказаться недостаточным. Кроме того, переход на более высокое напряжение может быть связан с утолщением пазовой изоляции. Поэтому не всегда удается сохранить общее сечение меди в пазу, что приводит к необходимости снижения мощности электродвигателя.
Переход электродвигателей на пониженное напряжение во многих случаях позволяет увеличить их мощность благодаря облегчению пазовой изоляции и уменьшению числа эффективных проводов в пазу.

Расчет при изменении частоты вращения.

При переводе на другую частоту вращения электродвигателей с короткозамкнутым ротором следует сверить по формулам (20) возможность такого перевода с точки зрения допустимого соотношения нового, измененного числа полюсов и числа пазов статора и ротора. При уменьшении числа полюсов и при сохранении индукции в воздушном зазоре увеличивается индукция в спинке статора. При увеличении числа полюсов имеет место обратная зависимость. Индукции же в зубцах остаются неизменными.
Пересчет электродвигателя в связи с изменением числа полюсов следует начинать с определения индукции на всех участках магнитной цепи. В некоторых случаях может оказаться, что спинка статора недостаточно загружена магнитным потоком и индукция в них может быть повышена. Это может иметь место у электродвигателей старых выпусков, где активные материалы не всегда были предельно загружены. В тех случаях, когда можно при измененном числе полюсов сохранить индукцию в зазоре и зубцах или

когда возросшая индукция в спинке и зубцах не окажется чрезмерной (превышение не более чем на 10–15% значений, приведенных в табл. 2), следует при пересчете руководствоваться следующим.

Из формулы (9) вытекает, что при сохранении индукции в зазоре и номинального фазного напряжения:

$$\frac{pс \times aс}{wэпс \times kос} = \frac{pн \times aн}{wэпн \times kон}$$

т. е. новое число эффективных проводов в пазу составит:

$$wэпн = wэпс \times \frac{kос \times aн \times pн}{kон \times aс \times pс} = wэпс \times \frac{kос \times aн \times nсс}{kон \times aс \times nсн}$$

При сохранении типа, шага обмотки и объема тока в пазу сечение эффективного провода составит:

$$Qэпн = Qэпс \times \frac{pс}{pн} = Qэпс \times \frac{nсн}{nсс}$$

Номинальная мощность электродвигателя:

$$Pн = Pс \times \frac{pс}{pн} = Pс \times \frac{nсн}{nсс}$$

Когда при увеличении частоты вращения приходится уменьшать индукцию в зазоре, чтобы ввести в норму индукцию в спинке статора, пропорционально увеличивается число эффективных проводов в пазу и уменьшаются сечение эффективного провода и номинальная мощность электродвигателя.

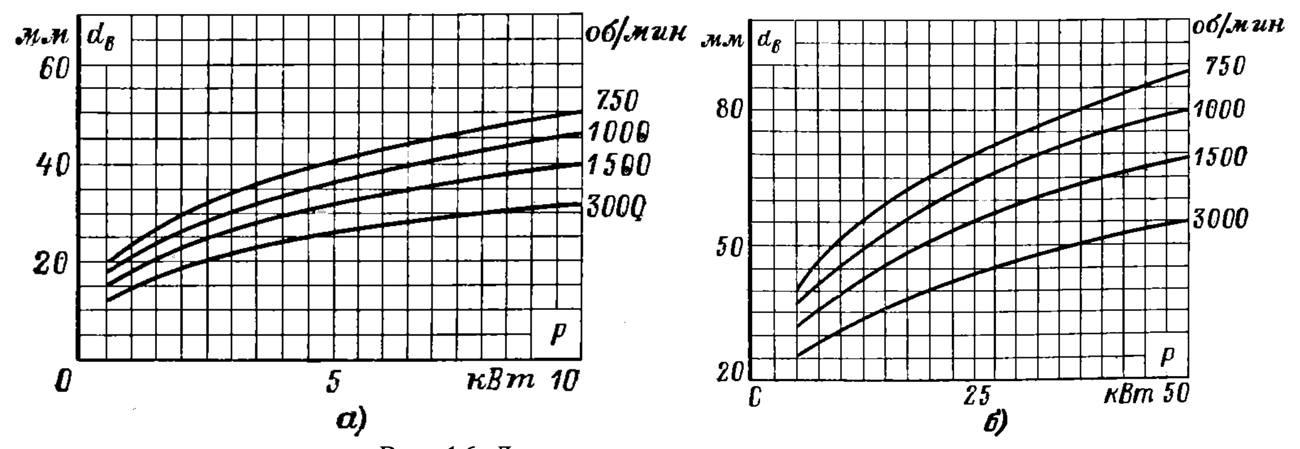


Рис. 16. Допустимая нагрузка на вал.
а – для электродвигателей до 10 *кВт*., б – для электродвигателей до 50 *кВт*.

Увеличение числа эффективных проводов в пазу влечет за собой ухудшение коэффициента заполнения паза. Поэтому при перемотке электродвигателя следует применять провода с более тонкой изоляцией и максимально допустимого диаметра (из условия возможности укладки его через шлиц паза).

Для увеличения диаметра провода следует пересмотреть и по возможности уменьшить число элементарных проводников в эффективном проводе и число параллельных ветвей в фазе.

Указанное выше изменение мощности электродвигателя при изменении частоты вращения может рассматриваться как приближенное, так как при увеличении частоты вращения, с одной стороны, увеличиваются потери на трение, а с другой стороны, повышается производительность вентилятора.

Увеличение мощности электродвигателя при повышении частоты вращения может ограничиваться механической прочностью его частей и их нагревом. При увеличении частоты вращения окружная скорость ротора не должна превышать: для фазного ротора 30–40 $м/с$, для короткозамкнутого ротора 40–60 $м/с$. Бандаж фазного ротора при увеличении частоты вращения обычно нуждается в усилении.

Следует также по рис. 16 проверить прочность свободного конца вала (т. е. конца вала, служащего для насадки шкива, муфты или шестерни).

Нагрев подшипников также увеличивается при повышении частоты вращения и увеличении мощности электродвигателя, что отрицательно сказывается на общем коэффициенте полезного действия электродвигателя.

При перемотках, связанных с уменьшением числа полюсов, увеличиваются шаг обмотки и вылет лобовых частей. Следует проверить допустимость этого с точки зрения обеспечения требуемого изоляционного расстояния между торцевыми крышками и обмоткой.

Расчет при замене медных проводов алюминиевыми.

При ремонте обмоток, связанном с заменой медных проводов алюминиевыми, основным фактором, влияющим на ход расчета, является различие в их удельном сопротивлении, составляющем при 20°С:

для меди ρм = 0,017 $Ом \times мм^2/м$.

для алюминия ρа = 0,028 $Ом \times мм^2/м$.

Отношение удельных сопротивлений алюминия и меди:

$$\frac{\rho \text{а}}{\rho \text{м}} = \frac{0{,}028}{0{,}017} = 1{,}65$$

Если выполнить вместо медной обмотки алюминиевую проводом того же размера, оставив без изменения индукцию в воздушном зазоре и число эффективных проводов в пазу, то при номинальном токе возрастут потери в обмотке. Потери в стали останутся без изменения. Для того чтобы сохранить потери в обмотке на прежнем уровне и тем сохранить суммарные потери электродвигателя, необходимо снизить фазный ток. Это снижение определится следующим образом.

Потери в фазе медной обмотки ($Вт$.):

$$\Delta P\text{м} = \frac{I^2\text{фм} \times \rho\text{м} \times l}{Q\text{эм}}$$

Здесь и далее к обозначениям, относящимся к исполнению обмотки медным проводом, добавляется индекс "м", и к исполнению алюминиевым проводом – индекс "а".

Потери в фазе алюминиевой обмотки ($Вт$.):

$$\Delta P\text{а} = \frac{I^2\text{фа} \times \rho\text{а} \times l}{Qэа}$$

где: l – длина всех эффективных проводов в фазе.

Из условий равенства потерь и размеров провода вытекает:

$$I\text{фа} = \frac{I\text{фм}}{\sqrt{1{,}65}} = 0{,}78 \times I\text{фм}$$

т. е. фазный ток должен быть снижен на 22%. Практически на столько же снижается и номинальная мощность электродвигателя.

Если же требуется сохранить номинальные ток и мощность электродвигателя, то для сохранения потерь в обмотке статора следует увеличить сечение эффективного провода. Это увеличение определяется следующим образом. Так как:

$$\frac{I^2ф \times \rho м \times l}{Qэм} = \frac{I^2 \times \rho а \times l}{Qэа} \quad \text{то:} \ \frac{\rho м}{Qэм} = \frac{\rho а}{Qэа} = \frac{1{,}65 \times \rho м}{Qэа} \quad \text{или} \quad Qэа = 1{,}65 \times Qэм$$

При изготовлении обмотки из круглых проводов диаметр неизолированного алюминиевого провода должен быть увеличен по сравнению с медным:

$$dэа = \sqrt{1{,}65} \times dэм = 1{,}28 \times dэм$$

т. е. на 28%.

Так как укладка требуемого числа проводов при таком увеличении их диаметра невозможна, то при замене медных проводов алюминиевыми прибегают к следующим мерам.

1. Применяют обмоточные провода класса нагревостойкости Е марки ПЭВА–2 на поливинилацеталевом лаке или марки ПЭЛРА–2 на полиамиднорезольном лаке, имеющих более тонкую изоляцию, чем медные провода класса нагревостойкости А, марок ПБД и ПЭЛБО, которыми выполнялась обмотка в заводском исполнении.
2. Изоляцию паза выполняют тонкими электроизоляционными материалами класса нагревостойкости Е.
3. Увеличивают коэффициент заполнения паза, так как по сравнению с медными алюминиевые провода более эластичны.
4. Изменяют тип обмотки, применяют однослойную обмотку вместо двухслойной с целью исключения прокладки между катушками в пазу.
5. Изменяют схему обмотки, уменьшают число параллельных проводников в эффективном проводе или число параллельных ветвей в фазе, с целью применения элементарных проводников максимально допустимого диаметра 2,26 *мм*. (Для медных проводов максимально допустимый диаметр элементарного проводника составляет 1,86 *мм*.)

Для электродвигателей мощностью до 100 *кВт* со всыпной обмоткой подробные рекомендации по замене медных проводов алюминиевыми, направленные либо на сохранение номинальной мощности электродвигателя при одновременном переводе их изоляции на класс нагревостойкости Е, либо на незначительное снижение (на 10 – 15%) при сохранении класса изоляции А, разработаны инженером Н. М. Слонимом ("Алюминиевые провода при ремонте асинхронных двигателей", 1973, М., Энергия, 136 стр.). В этих рекомендациях учтена необходимость сохранения допустимых значений вращающих моментов, cosφ и η.

Расчет при изменении коэффициента заполнения паза.

При ремонте электродвигателей старых выпусков представляется возможным увеличить коэффициент заполнения паза путем применения обмоточных проводов с более тонкой изоляцией. Естественно, что при увеличении сечения проводов, заложенных в паз, могут быть повышены ток и мощность электродвигателя. Однако это повышение не может быть пропорциональным увеличению коэффициента заполнения паза. Следует учитывать, что для электродвигателя должны быть выдержаны отношение максимального вращающего момента к номинальному, что достигается увеличением индукции в воздушном зазоре (максимальный момент увеличивается пропорционально квадрату индукции в воздушном зазоре) путем уменьшения числа эффективных проводов в пазу. Так как повышение индукции в воздушном зазоре связано с увеличением индукций на всех других участках магнитной цепи, то при этом увеличиваются потери в стали.

С другой стороны, уменьшение числа проводов в пазу позволяет увеличить их сечение (помимо увеличения сечения за счет повышения коэффициента заполнения паза) и тем самым снизить потери в обмотке.

Н. М. Слоним установил, что сохранение кратности максимального и номинального моментов, а также сохранение суммарных потерь при увеличении коэффициента заполнения паза достигается, когда каждому проценту увеличения коэффициента заполнения паза соответствует 0,7% увеличения мощности электродвигателя. Если отношение коэффициентов заполнения паза в новом и старом исполнении составляет:

$$b = \frac{k\text{пн}}{k\text{пс}}$$

то для увеличения мощности в указанном соотношении следует:

число эффективных проводов в пазу уменьшить в соотношении:

$$\frac{w\text{эпн}}{w\text{эпс}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}}$$

а сечение эффективного провода увеличить в соотношении:

$$\frac{Q\text{эн}}{Q\text{эс}} = b \times \sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}$$

При этих изменениях плотность тока в обмотке уменьшится:

$$\frac{i\text{н}}{i\text{с}} = \frac{\sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}}{b}$$

а линейная нагрузка и индукция в зазоре увеличатся:

$$\frac{A\text{н}}{A\text{с}} = \frac{B\delta\text{н}}{B\delta\text{с}} = \sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}$$

Также уменьшится произведение плотности тока на линейную нагрузку:

$$\frac{i\text{н} \times A\text{н}}{i\text{с} \times A\text{с}} = \frac{\sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}}{b}$$

Практически увеличение коэффициента заполнения паза может изменяться от 1,1 до 1,5. Для этих значений указанные выше соотношения сведены в табл. 4.

Ввиду сохранения потерь на прежнем уровне при одновременном увеличении номинальной мощности электродвигателя его к. п. д. возрастает, а коэффициент мощности несколько уменьшится.

Таблица 4.

Соотношение параметров	Значение соотношений параметров при коэффициентах b								
	1,1	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,5
$\frac{P\text{н}}{P\text{с}};\frac{I\text{фн}}{I\text{фс}}$	1,07	1,105	1,14	1,175	1,21	1,245	1,28	1,315	1,35
$\frac{w\text{эпн}}{w\text{эпс}}$	0,97	0,955	0,94	0,925	0,91	0,90	0,88	0,87	0,86
$\frac{Q\text{эн}}{Q\text{эс}}$	1,14	1,21	1,28	1,36	1,43	1,50	1,58	1,66	1,74
$\frac{i\text{н}}{i\text{с}}$	0,94	0,915	0,890	0,875	0,850	0,825	0,805	0,790	0,775
$\frac{A\text{н}}{A\text{с}};\frac{B\delta\text{н}}{B\delta\text{с}}$	1,035	1,05	1,07	1,085	1,10	1,115	1,13	1,145	1,16
$\frac{i\text{н}A\text{н}}{i\text{с}A\text{с}}$	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,922	0,915	0,909	0,905

Расчет для определения обмоточных данных.

Как указывалось, в ремонт могут поступать электродвигатели, в которых отсутствуют паспортные щитки, а обмотки либо демонтированы, либо повреждены в такой степени, что не представляется возможным определить и при ремонте сохранить их параметры. Также может быть, что обмотка электродвигателя не заводского исполнения и нет уверенности в ее технической правильности. В этих случаях следует проверить, нет ли в альбомах обмоточных данных такого электродвигателя, геометрические и конструктивные размеры которого совпадают с данными ремонтируемого электродвигателя. При таком совпадении, когда ремонтируемому электродвигателю будет подобран его заводской паспорт, надобность в расчете отпадает, при ремонте полностью повторяется заводское исполнение обмотки. Если же по альбому обмоточных данных не будет установлен паспорт электродвигателя, то требуемое напряжение и частота вращения оговариваются заказчиком в задании на ремонт, а обмоточные данные устанавливают расчетным путем на основании снятых с натуры размеров, руководствуясь данными по допустимым электромагнитным нагрузкам, приведенным в табл. 2.

Для рассматриваемого вида ремонта последовательность расчета следующая:

1. Вычисляют в соответствии с заданием и размерами электродвигателя:
   - число полюсов $2p$ – по формуле (1);
   - полюсное деление τ – по формуле (4);
   - зубцовый шаг статора t – по формуле (5);
   - активную длину пакета стали l – по формуле (6);
   - площадь паза Qп – по рис. 15;
   - расчетную ширину зубца статора b – по формуле (7);
   - высоту спинки hс – по формуле (8).
2. Определяют (ориентировочно) полезную мощность электродвигателя (*кВт.*):

$$P = A \times D^2 \times l \times n\text{с}$$

где: A – коэффициент использования (постоянная мощности), значение которого в зависимости от полюсного деления τ приведено на рис. 17.

Мощность электродвигателя, определенная по этой формуле, является приближенной. Вычисление ее производится только для возможности пользования при расчетах табл. 2, где допустимые электромагнитные нагрузки и коэффициент заполнения паза указаны в зависимости от мощности электродвигателя.

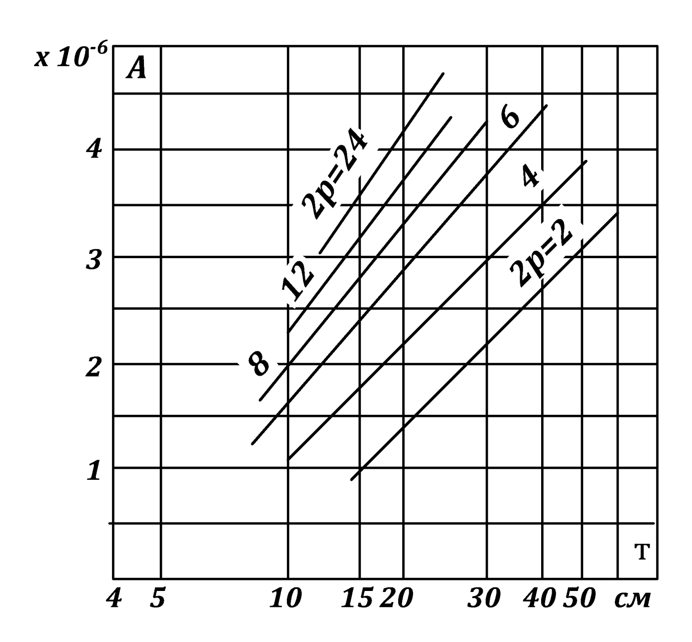


Рис. 17. Зависимость постоянной мощности A от полюсного деления τ.

3. Руководствуясь табл. 2 и сообразуясь с ориентировочной мощностью электродвигателя, задаются индукцией в воздушном зазоре и вычисляют значение индукции в зубцах статора по формуле (13) и в спинке статора по формуле (14).
Расчет начинают, задаваясь максимальным значением $B\delta$ (в табл. 2 для каждой мощности указаны предельные максимальное и минимальное значения индукции). Целесообразность этого следует из формулы (9). Увеличение $B\delta$ влечет за собой пропорциональное уменьшение числа эффективных проводов в пазу, что в свою очередь позволяет увеличить сечение каждого эффективного провода и тем самым повысить фазный ток и мощность электродвигателя.
Однако индукции в зубцах и спинке статора пропорциональны индукции в воздушном зазоре. Чрезмерное значение индукции в воздушном зазоре может привести к недопустимым индукциям в активной стали электродвигателя и, как следствие этого, к увеличению намагничивающего тока, возрастанию потерь и снижению коэффициентов мощности и полезного действия электродвигателя. При очень больших индукциях в спинке статора наблюдается вытеснение потока в окружающие конструктивные детали электродвигателя и сильный нагрев этих деталей. В таких случаях предварительно выбранное максимальное значение индукции в зазоре должно быть снижено в такой степени, чтобы сопряженные с ней индукции на других участках магнитной цепи электродвигателя уложились бы в допустимые пределы.
Если при составлении вариантов расчетов индукций при различных значениях не удается добиться требуемых результатов, то это может быть по причине неправильного задания при заказе на ремонт, например частоты вращения электродвигателя.
Из сопоставления формул (9) и (14), принимая среднее из приведенных в табл. 2 значений индукции в спинке статора, можно получить следующую ориентировочную зависимость между числом полюсов, диаметром расточки и высотой спинки статора:

$$2p = 0{,}5 \div 0{,}6 \times \frac{D}{hc}$$

Поэтому при неудовлетворительных результатах подсчета индукции следует произвести повторные расчеты при другом числе полюсов, вычисленном по этой формуле. Если при допустимом значении индукции в зазоре получается завышенная индукция в спинке статора, следует увеличить число полюсов и тем самым разгрузить спинку. Если же индукция Bс значительно меньше указанной в табл. 2, то следует уменьшить число полюсов.

4. Выбирают тип обмотки. В асинхронных двигателях малой и средней мощности для статоров применяют однослойную обмотку с концентрическими катушками, а также двухслойную и однослойную цепную обмотки. В крупных электродвигателях применяют главным образом двухслойные обмотки, реже однослойные с концентрическими катушками.
Как указывалось, в электродвигателях мощностью 0,6 – 100 *кВт.* серий А и АО применена однослойная обмотка для всех электродвигателей 3–го и 4–го габаритов и для четырех– и шестиполюсных электродвигателей 5–го габарита. В сериях А2 и АО2 применена однослойная обмотка для всех электродвигателей 1–го и 2–го габаритов и для электродвигателей 3–го и 4–го габаритов серии АО2. Для всех остальных серий А, АО, А2 и АО2 применена двухслойная обмотка.
При ремонте электродвигателей упомянутых серий целесообразно сохранить типы их обмоток. При выборе обмотки для электродвигателей старых типов, поступивших в ремонт с демонтированной обмоткой, следует руководствоваться следующими соображениями.
В двухслойных обмотках масса обмоточных проводов на 10 – 15% меньше, чем в однослойных, что уменьшает электрическое сопротивление обмотки и тем самым повышает к. п. д. и cosφ электродвигателя. Обмотка может быть выполнена при q любой дробности, что также очень важно.
Достоинством однослойных обмоток является более высокий коэффициент заполнения паза медью из–за отсутствия прокладки между верхней и нижней сторонами катушек, заложенных в паз. А так как укорочение шага связано с увеличением числа эффективных проводов в пазу, то применение однослойных обмоток для мелких электродвигателей может обеспечить большую мощность, чем при двухслойной обмотке. Трудоемкость ее укладки в пазы несколько ниже, чем двухслойной.
После выбора типа обмотки статора вычисляют шаг обмотки.
при однослойной обмотке диаметральный:

$$y = \frac{Z}{2p}$$

при двухслойной укороченный:

$$y = ky \times \frac{Z}{2p}$$

где ky – коэффициент укорочения, равный 0,8 – 0,85.
Определяют обмоточный коэффициент kо по табл. 3.
5. Определяют на основании формулы (9) число эффективных проводов в пазу:

$$w\text{эп} = \frac{2{,}5 \times U\text{ф} \times p \times a}{B\delta \times Z \times D \times l1 \times k\text{о}} \times 10^2$$

Разбивка обмотки фазы на параллельные ветви ($a > 1$) и, как будет указано ниже, разбивка эффективного провода на элементарные провода ($m1 > 1$) производится для того, чтобы провод мог проходить через шлиц паза. В электродвигателях малой и средней мощности стремятся выполнить обмотку с $a = 1$ и $m_1 = 1$, причем в электродвигателях малой мощности это условие обычно получается автоматически. При определении числа параллельных ветвей в каждой фазе обмотки и числа элементарных проводников в эффективном проводе, заложенном в паз, руководствуются следующим: при заданном сечении эффективного провода следует стремиться применить один провод или несколько проводов максимально допустимого сечения. Как указывалось, максимальный диаметр провода (без изоляции) не должен превышать для обмоток из медного провода 1,81 *мм*. и для обмоток из алюминиевого провода 2,26 *мм*.; диаметр изолированного провода должен быть на 0,5 – 0,7 *мм*. меньше

размера шлица паза. В противном случае может иметь место повреждение изоляции проводов при их укладке. Число параллельных ветвей в фазе не может быть произвольным Выполнимость обмотки с тем или иным числом параллельных ветвей описывалась в §2. Для практических целей при выборе числа параллельных ветвей для электродвигателей мощностью до 100 *кВт*. можно пользоваться табл. 5.

Таблица 5.

Вид обмотки	Рекомендуемое число параллельных ветвей при числе полюсов электродвигателя					
	2	4	6	8	10	12
Двухслойная	1	1, 2	1, 2, 3	1, 2, 4	1, 2, 5	1, 2, 3, 4, 6
Однослойная	1	1, 2	1, 3	1, 2, 4	1, 5	1, 2, 3, 6

6. Определяют на основании формулы (19) сечение элементарного изолированного проводника ($мм^2$):

$$q\text{эи} = \frac{k\text{п} \times Q\text{п}}{n} = \frac{k\text{п} \times Q\text{п}}{m1 \times w\text{эп}}$$

где: n – общее число элементарных проводников в пазу.
Число элементарных проводников в эффективном проводе m_1 предопределено числом параллельных ветвей в фазе обмотки a; чем больше a, тем соответственно меньше m_1. Следует учитывать, что с уменьшением m_1 повышается коэффициент заполнения паза. Поэтому определение qэи следует производить при трех–четырех вариантах m_1 и выбрать тот вариант, при котором диаметр изолированного элементарного проводника (*мм*.), равный:

$$d\text{эи} = 1{,}13 \times \sqrt{q\text{эи}}$$

будет ближе к максимально допустимому.
Диаметр неизолированного элементарного проводника (*мм*.):

$$d\text{э} = d\text{эи} - \Delta$$

где Δ – двусторонняя толщина изоляции провода.
Ввиду большой номенклатуры применяемых обмоточных проводов часто бывает, что провод требуемых размеров отсутствует. В этих случаях прибегают к его замене двумя проводами, эквивалентными по суммарному сечению. Следует учитывать, что эта замена всегда влечет за собой увеличение коэффициента заполнения паза.
7. Вычисляют фазный ток статора (А) по формуле:

$$I\text{ф} = j \times a \times m_1 \times q\text{э}$$

где qэ – сечение элементарного неизолированного проводника соответствующее величине dэ, приведенное в соответствующих каталогах или определяемое по формуле ($мм^2$)

$$q\text{э} = \frac{\pi \times d^2\text{э}}{4}$$

j – плотность тока по табл. 2, $А/мм^2$.
8. Определяют величину А по формуле (18) и вычисляют произведение $j \times A$. Если это произведение превзойдет допустимые пределы, следует снизить Iф до такой степени, чтобы значения указанных произведений уложились в допустимые пределы.

9. Определяют кажущуюся мощность ($кВ \times А$), потребляемую электродвигателем, по формулам (16) или (17):
при соединении фаз в звезду

$$P' = \frac{\sqrt{3} \times U \times I ф}{1000}$$

при соединении фаз в треугольник:

$$P' = \frac{3 \times U \times I ф}{1000}$$

Номинальная мощность электродвигателя (мощность на валу), *кВт*.

$$P = P' \times \eta \times cos\varphi$$

Значения η и cosφ подбирают по альбому обмоточных данных.

Примечание к таблице обмоточных коэффициентов на стр. 19.

Представить все практические значения обмоточного коэффициента, применяемого при расчете витков обмотки, при сокращении шага обмотки, в таблице затруднительно. Поэтому промежуточные значения возможно вычислить интерполяцией. Интерполяция – это метод подсчета неизвестного значения по ранее известным зависимым данным.
Например: при расчете обмотки, имеющей 2 катушки в группе, принимаем укороченный шаг 11, вместо диаметрального 12. То есть вместо из 1 паза в 13 паз принимаем из 1 в 12 (1–12 вместо 1–13). Таким образом сокращение шага составляет:

$$\frac{11}{12} = 0{,}916$$

для такого значения в таблице нет обмоточного коэффициента. Однако полученное значение 0,916 находится между значениями 0,9 и 0,95. В обмотке 2 катушки и обмоточный коэффициент для 2 катушек известен, для 0,95 = 0,939 и для 0,9 = 0,954. Необходимо найти обмоточный коэффициент для сокращенного шага 0,916. Обозначим условно имеющиеся данные и рассчитаем данные по представленной формуле интерполяции:

A = 0,9 соответственно a = 0,954
C = 0,916 найти нужно c = ?
B = 0,95 соответственно b = 0,963

$$c = a + \frac{b - a}{B - A} \times (C - A) = 0{,}954 + \frac{(0{,}963 - 0{,}954)}{(0{,}95 - 0{,}9)} \times (0{,}916 - 0{,}9) = 0{,}954 + \frac{0{,}009}{0{,}05} \times 0{,}016$$

$$= 0{,}954 + (0{,}18 \times 0{,}016) = 0{,}954 + 0{,}00288 = 0{,}95688$$

Таким образом обмоточный коэффициент для сокращенного шага 0,916 равен 0,956.

Другой вариант подсчета по известным данным. Подсчитаем, на какую величину изменяется обмоточный коэффициент при уменьшении укорочения шага на одну сотую единицы.

$$\frac{0{,}963 - 0{,}954}{0{,}95 - 0{,}90} = \frac{0{,}009}{0{,}05} = 0{,}18$$

Вычислим, на какую величину изменится обмоточный коэффициент при укорочении шага 0,916 по сравнению с обмоточным коэффициентом при укорочении шага 0,9.

$$0{,}18 \times (0{,}916 - 0{,}9) = 0{,}18 \times 0{,}016 = 0{,}0028$$

Теперь можно определить обмоточный коэффициент обмотки при укорочении шага 0,916.

$$k\text{у} = 0{,}954 + 0{,}0028 = 0{,}95688$$

Формулы для подсчета коэффициентов: распределения, сокращенного шага, обмоточного коэффициента приводится в Е. Л. Маршак "Ремонт и модернизация асинхронных двигателей" 1970 г.

Наиболее рациональные практические сокращения шагов обмоток смотрите в книге Девотченко Ф. С. "Замена обмотки трехфазных электродвигателей", часть 1, 1991 г.